

Modélisation numérique Navier-Stokes / VOF des vagues générées par un glissement de terrain aérien

Stéphane Abadie¹, Denis Morichon¹, Stephan Grilli² & Stéphane Glockner³

¹Université de Pau et des Pays de l'Adour
Laboratoire de Sciences Appliquées au Génie Civil et Côtier
Allée du Parc Montaury, 64600 Anglet, FRANCE
stephane.abadie@univ-pau.fr

²University of Rhode Island
Department of Ocean Engineering,
Narragansett, RI 02882, USA

³CNRS – Université de Bordeaux I
Laboratoire Trefle – UMR 8508
Site ENSCPB. 16 Avenue Pey-Berland, 33607 Pessac Cedex, FRANCE

Résumé :

La génération de vagues par des glissements de terrain est étudiée à l'aide d'un modèle basé sur les équations de Navier-Stokes et un suivi d'interface PLIC-VOF. L'originalité de l'étude repose sur la prise en compte implicite du couplage glissement/fluide. Le modèle est validé dans un premier temps, dans le cas de génération d'un soliton par la chute d'un bloc rigide à l'extrémité d'un canal. Une étude numérique de l'influence du caractère déformable du glissement est ensuite proposée. Ce travail met en évidence l'importance et la complexité du rôle de cette déformation sur les caractéristiques des vagues générées. Il convient donc de prendre en compte de manière plus fine la rhéologie du glissement dans le processus de prédiction des tsunamis.

Abstract :

Landslide generated impulse waves are studied using a numerical model based on the Navier-Stokes equations and a VOF algorithm to track the interfaces. This model is able to implicitly describe the coupling between slide and water. First, simulations are compared with existing measurements in the case of a soliton generated by a rigid bloc falling down in a shallow water flume. A study of the role of slide deformation is then carried out. The results highlight the importance of this deformation on wave characteristics. It is thus recommended to consider slide rheology in tsunami risk assessment.

Mots-clefs : Glissement de terrain ; Vagues ; Navier-Stokes-VOF.

1 Introduction

Les glissements de terrain, qu'ils soient sous marins ou aériens, sont susceptibles de générer des vagues de surface qui peuvent représenter un risque pour les populations et les infrastructures. La modélisation physique est une approche fréquemment mise en œuvre pour l'étude de site. Elle peut cependant se révéler parfois lourde et coûteuse et à ce titre, la modélisation numérique est un outil complémentaire particulièrement intéressant. De plus, cette dernière permet souvent un accès plus facile aux différentes variables de l'écoulement en tous les points de l'espace et s'avère donc très efficace pour une étude fine des processus.

Les études numériques antérieures peuvent être classées en deux groupes. Dans le premier, le mouvement du glissement est imposé a priori à partir d'une équation de mouvement semi-empirique. Le deuxième groupe d'auteurs propose un calcul complet du couplage entre la glissement et l'eau. Monaghan & Kos (2000) utilisent ainsi une formulation SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) pour étudier le cas de génération d'un soliton par la chute d'un bloc

rigide en eau peu profonde. Heinrich (1992) et Assier Rzakiewicz *et al.* (1997) proposent des simulations Navier-Stokes 2D avec un suivi d'interface de type VOF dans des cas sous-marins et aériens sans air. Gisler *et al.* (2006) étudie le cas de La Palma avec un modèle Navier-Stokes compressible et Quecedo *et al.* (2004) proposent une simulation avec eau et air du cas de la baie de Lituya. Ces différents résultats proposés à partir des équations de Navier-Stokes, sont très prometteurs, cependant, la question de la validité précise du couplage glissement/eau est quelque peu éludée et d'autre part, la physique du phénomène est rarement détaillée.

Dans cet article, nous proposons des résultats issus du modèle Aquilon (UMR 8508) basé sur les équations de Navier-Stokes et un suivi d'interface de type VOF. Dans la section 2, les équations du modèle sont brièvement exposées. En section 3, la génération d'un soliton par la chute d'un bloc rigide est étudié. Enfin, dans la dernière section, le potentiel du modèle est illustré au travers de l'étude de l'influence du caractère déformable du glissement sur la vague générée.

2 La modélisation numérique

Le domaine de calcul est composé de trois fluides : l'eau, l'air et le glissement de terrain. Le caractère fluide d'un glissement de terrain dépend fortement de la concentration d'eau dans le sol composant le glissement. Pierson & Costa (1987) stipulent que pour une concentration d'eau supérieure à 50%, le glissement a un comportement de fluide newtonien. Pour des concentrations inférieures, le glissement devient viscoplastique avec différentes lois rhéologiques suivant qu'il s'agisse d'écoulements de débris ou de matériaux granulaires. Les trois fluides obéissent aux mêmes équations de Navier-Stokes (2) et à la condition d'incompressibilité (1):

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U \right) = \rho g - \nabla P + \nabla (\mu (\nabla U + \nabla^t U)) \quad (2)$$

Dans l'équation (2), la présence de plusieurs fluides, se traduit par des variables masse volumique et viscosité dépendantes du point considéré. Les équations (1) et (2) sont résolues par la mise en œuvre d'un algorithme de lagrangien augmenté à paramètre numérique variable dans l'espace (Lubin *et al.*, 2006). Les équations ainsi obtenues sont discrétisées sur un maillage fixe structuré. Le système linéaire est inversé par l'algorithme itératif BiCGSTAB (Van der Vorst, 1992). Une fois le champ des vitesses connu, la nouvelle interface entre les différents fluides est recalculée soit par l'algorithme eulérien-lagrangien PLIC-VOF (Abadie *et al.*, 1998) comme dans la section 3, soit en utilisant un schéma explicite TVD Lax wendroff (LeVeque, 1990) comme dans la section 4. Lubin *et al.* (2006) montrent que les deux méthodes conduisent à une précision équivalente sur le cas du déferlement plongeant. Comme il s'agit d'un cas à trois fluides, l'interface qui entoure l'eau est d'abord advectée puis on déplace l'interface qui entoure le glissement. Lorsque la méthode PLIC-VOF est utilisée, cette procédure peut conduire à des interfaces non congruentes. Dans ce cas, on utilise la méthode développée par Breil (2001) afin d'éviter ce problème. L'écriture de l'équation (2) sur un maillage nécessite enfin de calculer une masse volumique et densité équivalente dans les mailles où il y a plusieurs fluides. Dans ce cas, des moyennes pondérées par les fractions volumiques sont utilisées.

3 Validation

Le modèle a été validé dans le cas de la génération d'un soliton par la chute d'un bloc rigide à l'extrémité d'un canal peu profond (Abadie *et al.* 2006). Les résultats de simulations ont été comparés aux mesures réalisées par Monaghan & Kos (2000). L'expérience se compose d'un canal de 9 m et d'un bloc de hauteur 0.4 m, de longueur 0.3 m, d'épaisseur 0.39 m et de poids 38.2 kg. Des mesures ont été réalisées pour les profondeurs : D=0.288 m, D=0.21 m et D=0.116

m. Pour chaque cas, la position du bloc, la forme et les dimensions de la surface libre près de ce dernier et la hauteur de vague à 1.2 m de l'extrémité gauche du canal sont mesurées au cours du temps. Les simulations numériques utilisent un maillage de 250x130 irrégulier en x ($\Delta x_{\min}=6$ mm près du bloc) et régulier en y ($\Delta y=6$ mm). La rigidité du bloc est obtenue en imposant une viscosité dynamique de 10^4 Pa.s (Caltagirone & Vincent, 2001).

La figure 1 présente les résultats issus de la simulation numérique avec $D=0.21$ m. L'enfoncement du bloc dans l'eau génère un vortex au niveau du coin droit. Monaghan et Kos (2000) observent également l'apparition de ce tourbillon, qui dans l'expérience est également associé à un déferlement plongeant localisé sur le côté droit du bloc. Ce déferlement peut être obtenu en raffinant de façon importante le maillage. Le vortex se détache ensuite du bloc pour se déplacer vers la droite en perdant de son intensité.

Du point de vue de la vitesse du bloc, les résultats obtenus sont corrects. La concordance est satisfaisante jusqu'au $2/3$ de la profondeur (Abadie *et al.*, 2006). A partir de ce niveau, le bloc simulé a tendance à se déplacer moins vite que dans la réalité. Les hauteurs de vagues sont également très proches des valeurs expérimentales.



Figure 1 : Simulation numérique de la génération d'un soliton par la chute d'un bloc rigide. Les interfaces eau et bloc sont représentées ainsi que les isocontours de vorticité $\Delta\omega=25$ s⁻¹ (en noir vorticité positive ($\omega_{\max}=200$ s⁻¹), en gris vorticité négative ($\omega_{\min}=-200$ s⁻¹).

4 Cas d'un glissement déformable

Dans cette section, nous proposons des simulations de génération de vagues par un glissement sur fond incliné (pente 50%). Initialement, le glissement semi-elliptique de longueur $L=1$ m et d'épaisseur $T=0.2$ m, est partiellement immergé avec une submergence légèrement négative $d/L=-0.048$ où d représente la cote du centre de gravité du glissement par rapport à la surface libre au repos. La vitesse initiale du glissement est nulle.

Le maillage est réalisé en coordonnées polaires avec 200 mailles en θ et 400 mailles dans la direction radiale. Il couvre un domaine compris entre $\theta_1=63.435^\circ$ et $\theta_2=90^\circ$, et $r_1=0.22$ m et $r_2=16$ m. Entre $r=0.22$ m et $r=8$ m, le pas radial est constant ($\Delta r/L=2.7 \cdot 10^{-2}$) et à partir de 8 m, il croît exponentiellement. Les conditions limites en vitesses sont des conditions de glissement sur toutes les parois du domaine. Pour les 10 premières itérations, qui correspondent à la mise en mouvement du glissement, le pas de temps est imposé à 10^{-2} s. Pour le reste de la simulation, il est calculé automatiquement avec une condition $CFL=0.5$.

Des simulations ont été réalisées en considérant différentes valeurs de viscosité pour le glissement ($\mu_s=5000, 500, 100, 10$ et 1 Pa.s). L'objectif de cette étude est d'illustrer l'influence du caractère déformable du glissement induit par la viscosité, sur les caractéristiques des tsunamis générés.

La figure 2 présente 3 planches sur lesquelles, les interfaces entre les fluides ainsi que les vitesses dans l'eau sont représentées pour les cas $\mu_s=5000, 100$ et 1 Pa.s. L'influence de la

viscosité est évidente sur la déformation du glissement à cette étape du mouvement. Dans le cas le plus visqueux, le glissement se comporte comme un solide quasi-rigide et conserve sa forme symétrique. Pour le cas intermédiaire, il se forme rapidement un bombement à l'avant du glissement qui a pour résultat de modifier son épaisseur apparente. Dans le dernier cas, le glissement s'est très fortement étiré et la partie avant s'enroule sous l'influence d'un mouvement tourbillonnaire. Le cas intermédiaire est le plus lent et les deux cas les moins visqueux sont les plus rapides. La surface libre est similaire dans les trois cas présentés. Il se forme une première vague, suivie d'une seconde qui semble plus cambrée. La position du glissement se situe dans ce cas et à cet instant approximativement entre les deux vagues.

Nous présentons, figure 3, les surfaces libres des cinq cas à des instants proches. Elles correspondent à l'évolution de la seconde vague environ 1.5 s après la figure précédente. Pour les cas 1, 2, 4 et 5, la forme générale de l'onde, son amplitude et sa longueur d'onde sont assez similaires, si l'on considère qu'elles ont été générées par des mouvements de glissements très différents. L'onde correspondant au cas 3, a été créée par le glissement le plus lent, induit par un coefficient de forme défavorable. D'un point de vue énergétique, c'est dans ce cas, que le maximum d'énergie a été transféré à l'eau par le glissement. Le résultat est une onde très fortement cambrée qui déferle de façon plongeante à $t=3.3$ s. On peut légitimement se poser la question de l'énergie finalement disponible, lorsque l'évolution de la surface libre devient quasi-stationnaire. La zone transitoire n'a pas été précisément délimitée lors de cette étude et fera l'objet de futures travaux. Nous avons cependant mesuré les hauteurs de vagues pour chaque cas à $t=4.5$ s. Les résultats ($H_1=23$ cm, $H_2=19$ cm, $H_3=8$ cm, $H_4=21$ cm et $H_5=20$ cm) mettent en évidence la dissipation induite par le déferlement dans le cas 3. Pour les autres cas, on obtient des hauteurs de vagues similaires, le cas 1 étant légèrement supérieur.

5 Conclusions

Cette étude porte sur la modélisation numérique de la génération de vagues par des glissements de terrain aériens à partir d'un modèle Navier-Stokes et un suivi d'interface VOF. Les comparaisons avec les expériences de Monaghan et Kos (2000) montrent que le modèle décrit correctement le couplage glissement/fluide ainsi que la déformation de la surface libre.

L'influence de la déformabilité du glissement sur la vague générée est étudiée à partir de simulations réalisées avec différentes valeurs de viscosité. La forme du glissement au cours du temps influence les paramètres de l'onde générée, pouvant dans certains cas entraîner le déferlement. Cet exemple souligne la nécessité d'améliorer la description de la rhéologie du glissement afin de réduire les incertitudes sur la prédiction des vagues.

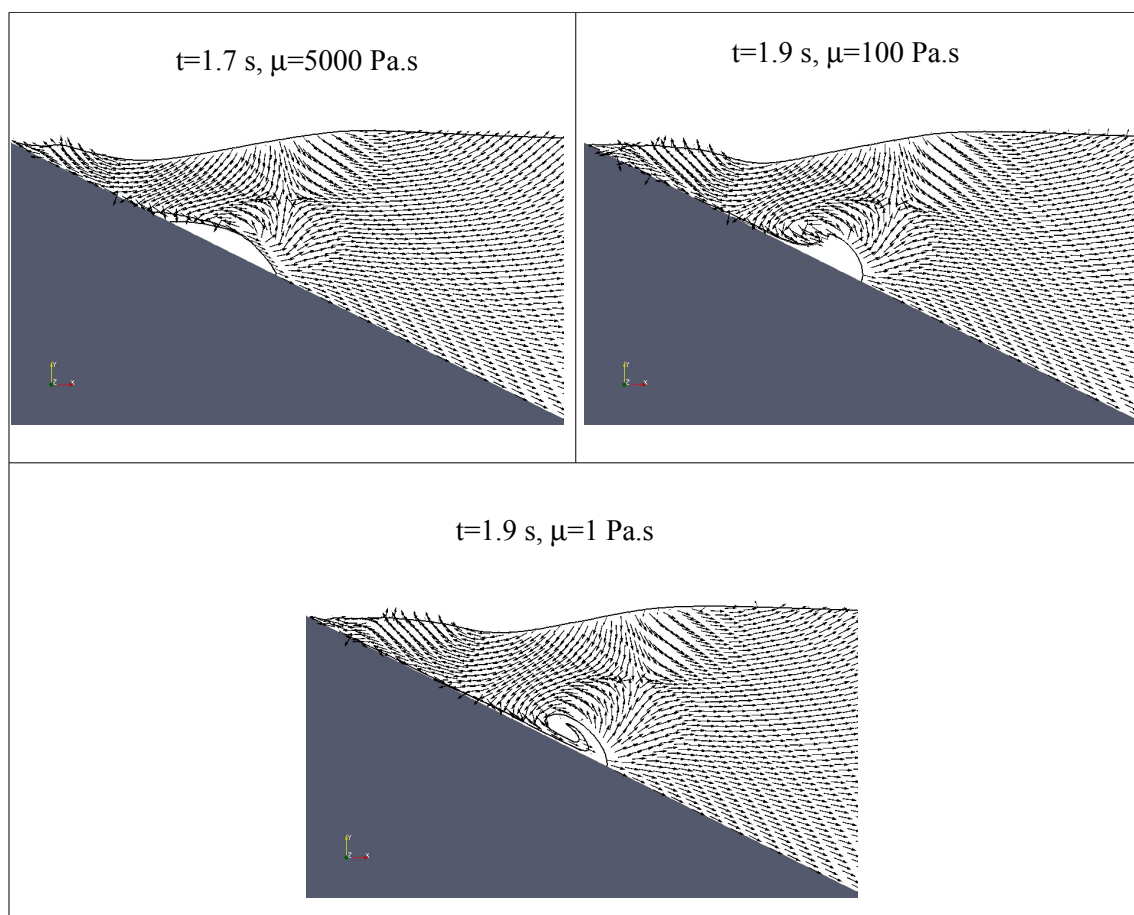


Figure 2 : Interfaces entre les différents fluides et champs des vitesses pour trois valeurs de viscosité du glissement.

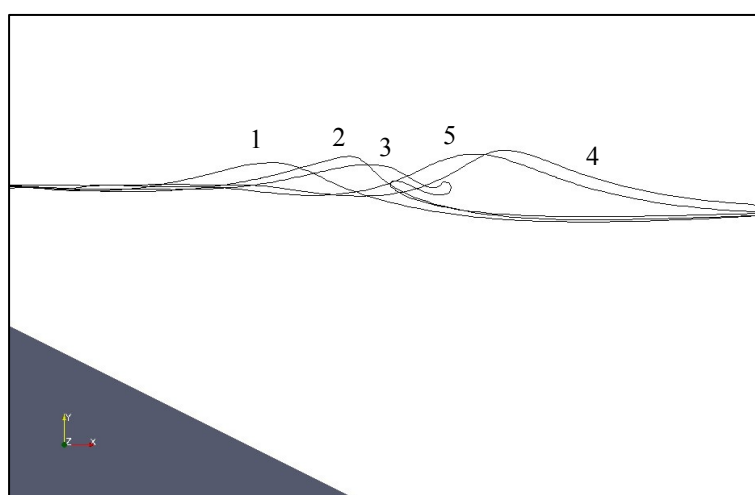


Figure 3: Interfaces eau/air pour les cinq cas de simulations. (1 – $\mu=5000$ Pa.s et $t=3.2$ s, 2- $\mu=500$ Pa.s et $t=3.3$ s, 3- $\mu=100$ Pa.s et $t=3.3$ s, 4- $\mu=10$ Pa.s et $t=3.7$ s, 5- $\mu=10$ Pa.s et $t=3.5$ s)

Références

- Abadie S. , Caltagirone J. P. & Watremez P., 1998, "Splash-up generation in a plunging breaker" . *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics-Physics-Astronomy*, Volume 326, Issue 9, Pages 553-559.
- Abadie, S, Grilli, S., Glockner, S. 2006 Fully coupled numerical modelling of tsunami generated by subaerial and submarine mass failures, International Conference on Coastal Engineering 2006, San Diego.
- Assier Rzadkiewicz, S. Mariotti, C., & Heinrich, P. 1997 Numerical Simulation of Submarine Landslides and their hydraulic effects. *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, 123,4,149-157.
- Breil, J. 2001 Modélisation du remplissage en propergol de moteur à propulsion solide. *Thèse de doctorat*. Université de Bordeaux 1, 164 p.
- Caltagirone, J. P. & Vincent, S., 2001 Tensorial penalization method for solving Navier Stokes equations. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 329, Série IIB, 607-613.
- Gisler, G., Weaver, R., & Gittings M.L., 2006 Sage calculations of the tsunami threat from La Palma, *Science of tsunami hazard*, 24, 4, 288-301
- Heinrich, Ph., 1992 Non linear water waves generated by submarine and aerial landslides. *J. Waterways, Port Coastal and Ocean Eng.* , 118, 249.
- LeVeque, R. J., 1990 Numerical Methods for Conservation Laws. *Lectures in Mathematics*. Birkhauser, Zurich.
- Lubin, P., Vincent, S., Abadie, S. & Caltagirone, J.P. 2006 Three-dimensional Large Eddy Simulation of air entrainment under plunging breaking waves, *Coastal Engineering*, Volume 53, issue 8, 631-655.
- Monaghan J. J. & Kos A., 2000 Scott Russell's wave generator, *Physics of Fluids*, 12, 3, p 622-630.
- Quecedo, M., Pastor M. & Herreros M., 2004 Numerical modelling of impulse wave generated by fast landslides. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 59, 1633-1656.
- Van Der Vorst, H. A., 1992 Bi-cgstab : a fast and smoothly converging variant of bi-cg for the solution of non-symmetric linear systems. *SIAM J. Sci. Statist. Comput.* 12, 631-644.